第 40 卷 第 5 期
2023 年 10 月

应 用 力 学 学 报
Chinese Journal of Applied Mechanics

Vol. 40 No. 5
Oct. 2023

文章编号:1000-4939(2023)05-1106-11

含单裂隙岩体蠕变破裂裂纹扩展演化规律研究

赵娜,孟利新,张怡斌

(辽宁工程技术大学力学与工程学院,123000 阜新)

摘　要:岩体内部存在大量不同尺寸裂隙,形成不同结构形式的裂隙岩体,裂隙的存在会降低岩体的力学性能,对于岩体工程的整体稳定性具有很大的影响。本研究基于滑动翼裂纹模型对恒定载荷下含单裂隙岩体蠕变变形进行了理论推导和分析,基于 MAPLE 软件直观给出恒定载荷下裂隙角度、长度对蠕变变形的影响,采用连续-非连续数值分析软件 GDEM,对预制单裂隙在不同倾角、不同长度情况下岩体的蠕变破裂裂纹扩展进行数值模拟。通过理论分析和数值模拟可以看出,岩体蠕变速率随着裂隙长度的增大而增大;随着裂隙角度的增加出现先增大后减小的趋势,其中裂隙倾角为 30°时蠕变速率最大。含单裂隙岩体蠕变破裂裂纹扩展规律的研究可为岩体工程蠕变破裂规律研究及蠕变治理提供一定的理论依据和参考。

关键词:单裂隙;蠕变破裂;裂纹扩展;演化规律;恒定载荷

中图分类号:TU45　　**文献标志码**:A　　**DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2023.05.016

Study on the meso-crack propagation and evolution law of creep fracture in rock mass with single fissure

ZHAO Na, MENG Lixin, ZHANG Yibin

(College of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, 123000 Fuxin, China)

Abstract: There are multiple cracks of different sizes in rock mass, forming cracked rock masses of different structural forms. The existence of cracks not only reduces the mechanical properties of rock mass, but also significantly affects the overall stability of rock mass engineering. Based on the sliding wing crack model, this paper theoretically deduces and analyzes the creep deformation of rock mass with single fracture under constant load. Based on the MAPLE software, the impact of the crack angle and length on the creep deformation under constant load is intuitively given. Apart from that, continuous-discontinuous numerical analysis software GDEM is used to numerically simulate the creep rupture crack propagation of rock mass under different inclination angles and different lengths of prefabricated single fissures. By theoretical analysis and numerical simulation, it can be observed that the creep rate of rock mass increases with the increase of crack length. Moreover, with the increase of crack angle, the creep rate first increases and then decreases, and it is the largest when the crack inclination angle is 30°. In short, the study on

收稿日期:2022-03-10　　**修回日期**:2022-06-21

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2017YFC1503101);辽宁省重点科技创新基地联合开放基金资助项目(No. 2020-KF-13-06);辽宁省教育厅资助项目(No. LJ2020JCL013)

通信作者:赵娜,副教授。E-mail:zhaona24@163.com

引用格式:赵娜,孟利新,张怡斌. 含单裂隙岩体蠕变破裂裂纹扩展演化规律研究[J]. 应用力学学报,2023,40(5):1106-1116.
ZHAO Na, MENG Lixin, ZHANG Yibin. Study on the meso-crack propagation and evolution law of creep fracture in rock mass with single fissure[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(5):1106-1116.

creep rupture crack propagation law of rock mass with single fissure can provide certain theoretical basis and reference for research on creep rupture law and creep control of rock mass engineering.

Key words: single crack; creep rupture; crack propagation; evolution law; constant load

岩石变形过程中与时间相关的现象称为流变。流变包括蠕变、松弛和弹性后效。岩石蠕变是指在应力不变的情况下,变形(或应变)随时间增长的现象。应力不变,岩石变形随时间逐渐增长的主要原因是岩石的非均匀性。岩石的非均匀性包括材料非均匀性和结构非均匀性,材料非均匀指岩石由不同的矿物质元素组成,而结构非均匀性指岩石中含有的孔隙、裂隙和孔洞等。天然岩体内部存在着大量的不同尺寸的裂隙,形成不同结构形式的裂隙岩体。在岩体工程中,裂隙孔隙的结构形式对于岩体工程的整体稳定性具有很大的影响。不同工程环境下的岩体结构裂纹扩展形式、变形响应及规律也不尽相同,这很大程度地影响了岩体结构工程的稳定性。含裂隙岩体的裂纹扩展过程更是十分复杂,裂隙的存在会降低岩体的力学性能,岩体内部裂隙扩展贯通形成宏观破坏面。由此所引发的工程失稳破坏事件屡见不鲜。影响裂隙岩体力学性能的因素很多,例如:岩体裂隙的尺寸、间距、倾斜角度等。国内外专家和学者对此已做过一些研究。杨圣奇等[1-2]通过单轴压缩试验,探究了含裂隙砂岩的力学特性,分析了裂隙倾角对含缺陷砂岩试件强度和变形行为的影响。LI 等[3]通过对单轴压缩下含裂隙的大理岩试件裂纹扩展进行试验,结果表明含预制裂隙试件的临界失稳载荷、破坏时的应变以及弹性模量都有所降低。NOLEN-HOEKSEMA 等[4]采用对真实岩石人为预制裂隙的方法研究裂纹对岩石的影响,在大理岩上预制斜裂纹并进行了单轴压缩试验,研究发现裂隙尖端产生的新裂纹不仅有所扩展而且扩展形式不以裂纹为对称轴对称。此外,还有更多学者在基于单裂隙的基础上对多裂隙岩体进行了研究,如贾东伟等[5]对断续三裂隙岩体开展单轴压缩实验,得到不同中心裂隙倾角下的岩样损伤劣化模式。蒲成志等[6-10]采用伺服控制的单轴加载系统对预制多裂隙的水泥砂浆试件进行试验,探讨了裂隙角度和分布密度对类岩石试件的影响,发现不同裂隙倾角对试件峰值强度的影响不同。相比单轴压缩试验之外,王辉等[11]对含裂隙试件开展了巴西圆盘试件的劈裂试验,得出了层理与预制裂隙共同作用下岩样的断裂特性和破坏机制。赵程等[12]利用数字图像相关方法(DICM),对含不同预置单裂纹的类岩石材料在单轴压缩作用下的裂纹扩展规律及岩体细观损伤演化机制进行了系统研究,研究表明随着裂隙角度的变化,裂纹形式和最大应变集中区域不同。李树刚等[13]利用自主研发的 YYW-Ⅱ应变控制式无侧限压缩仪及高精度声发射(AE) 监测系统,研究了含不同宽度预制裂隙的类岩石材料试样在单轴压缩条件下的受力变形和破坏模式,分析了预制裂隙宽度对类岩石材料破坏的影响规律。然而,与实验相比,数值模拟具有成本低廉、处理和分析结果快捷等优点,能针对同一个岩样进行多次预制变量的对比试验,从而避免了实验中由于岩样不同造成的误差,从而保证试验结果的准确性。张仕林等[14]采用单轴压缩试验,结合数值模拟方法,研究了红砂岩裂隙在不同张开度条件下的扩展机理。XU 等[15]通过单轴和双轴压缩数值试验,发现岩石破坏演化首先发生裂隙周围区域。HUANG 等[16]采用数值模拟方式对含双裂隙砂岩实验结果进行裂纹起裂位置及扩展方式的验证。

上述成果丰富了含裂隙岩体变形破坏方面的研究,对含裂隙岩体裂纹的产生以及含预制裂隙与应力之间的关系进行了研究,而关于在恒定外载荷作用下裂纹随时间二次扩展直至贯通发生宏观蠕变破裂的研究仍比较薄弱。本研究通过对恒定载荷下含单裂隙岩体的蠕变变形理论推导,给出恒定荷载下裂隙角度、长度对蠕变变形的影响,采用连续-非连续数值分析软件 GDEM,对预制单裂隙在不同倾角、不同长度情况下岩体的宏细观破裂机理进行研究,为裂隙岩体蠕变破裂裂纹扩展规律研究及蠕变治理提供理论依据。

1　单裂隙岩石蠕变变形破裂

含初始单裂隙岩石在单轴压缩状态下的受力简化模型如图 1(a)所示。根据线弹性断裂力学可知,当裂隙尖端的应力小于临界应力(断裂韧度)时,裂纹尖端不会发生裂纹扩展;当尖端应力大于或者等于临界应力(断裂韧度)时,裂隙尖端产生翼型裂纹,在两个初始裂纹端部发生裂纹扩展。

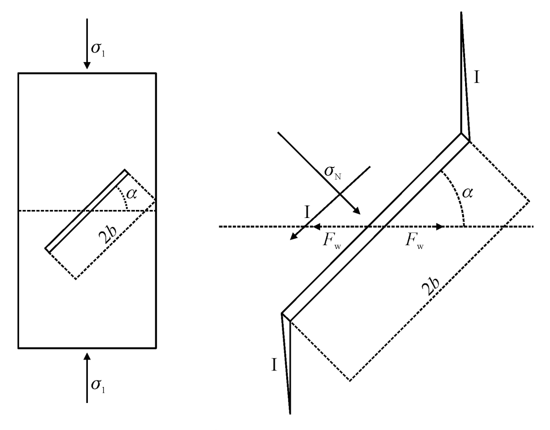


图1 单裂隙岩石简化模型

Fig. 1 Simplified model of single fractured rock

翼型裂纹是岩石受压缩荷载过程中出现断裂破坏的一种裂纹形式,是由主裂纹产生滑动面而形成。在翼型裂纹应力强度因子的近似式推导过程中,通常将岩体中的主裂纹与翼裂纹进行叠加。假定岩石为各向同性且包含初始微裂纹,裂纹长度为 $2b$;翼裂纹扩展长度为 l;裂纹方向角为 α;初始微裂摩擦系数为 β;锲入力为 F_w;μ 为常数。ASHBY 等[17]提出的脆性岩体翼型裂纹细观力学模型见图1(b),翼裂纹尖端的Ⅰ型应力强度因子可表示为

$$K_{\mathrm{I}} = \frac{F_w}{[\pi(l+\beta b)]^{\frac{3}{2}}} \tag{1}$$

假设岩体各向同性,翼裂纹方向与主应力 σ_1 方向一致。作用于初始微裂纹上的锲入力 F_w[18]在二维条件下的表达式可写为

$$F_w = \left\{(\tau+\mu\sigma_n)\pi b^2\sin\alpha = -A_1\sigma_1 b^2\right. \tag{2}$$

式中,A_1 为与摩擦系数 β、常数 μ 有关的参数,且有

$$A_1 = \pi\sqrt{\frac{\beta}{3}}\left(\sqrt{1+\mu^2}+\mu\right) \tag{3}$$

由断裂力学可知,在不考虑亚临界裂纹扩展作用的情况下,当主裂纹产生实际滑动,即作用于主裂纹上的切应力克服摩擦阻力时,其裂纹尖端才进行扩展。此时临界应力强度因子记为 K_{IC},临界应力可表达为[19-20]

$$\sigma_{\mathrm{IC}} = -\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{1+\mu^2-\mu}}\cdot\frac{K_{\mathrm{IC}}}{\sqrt{\pi b}} \tag{4}$$

鉴于亚临界裂纹扩展的影响,裂纹在 $K_{\mathrm{I}} < K_{\mathrm{IC}}$ 时,脆性岩石裂纹开始生长。对于微裂纹,裂纹增长率可表示为[21-22]

$$\frac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}t} = v\left(\frac{K_{\mathrm{I}}}{K_{\mathrm{IC}}}\right)^n \tag{5}$$

式中:指数 n 为应力腐蚀指数;v 为特征裂纹速度。两个常数都可以通过亚临界裂纹扩展测试获得。将式(1)代入式(5),可以得到随时间变化的翼裂纹长度的微分方程为

$$\frac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}t} = v(\pi b)^{n/2}\left[\frac{-A_1\sigma_1(c_1+c_2)}{K_{\mathrm{IC}}}\right]^n \tag{6}$$

式中,

$$c_1 = \pi^{-2}(l/b+\beta)^{-3/2} \tag{7}$$

$$c_2 = 2(\pi b)^{-2}\sqrt{l/b}\Big/\left[D_0^{-2/3}-\left(1+\frac{1}{\alpha b}\right)^2\right] \tag{8}$$

脆性岩石中往往存在许多初始微裂纹,并且微裂纹的分布是随机的。根据 WeiBull 概率分布[23],岩石损伤可表示为

$$D = 1-\exp\left[-\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^m\right] \tag{9}$$

式中:m 和 ε_0 是材料常数;ε 是轴向应变。由 BRISTOW[24]定义且被 WALSH[25-26]推广的关于初始裂纹密度对岩石的力学行为可知,含单裂隙岩石初始损伤可定义为

$$D_0 = 4\pi N_0(b\alpha)^3/3 \tag{10}$$

式中,N_0 是初始单裂纹的单位体积值,将初始损伤代入方程式(9),可以得出裂纹扩展之前的弹性应变为

$$\varepsilon_e = \varepsilon_0[-\ln(1-D_0)]^{1/m} \tag{11}$$

随着裂纹的扩展,微裂纹的密度和大小发生变化,损伤可以定义为[22]

$$D = \frac{4}{3}\pi N_0(1+\alpha b)^3 \tag{12}$$

比较式(10)与式(11),可以得出宏观应变与翼裂纹的成长之间的关系为

$$\varepsilon = \varepsilon_0[-\ln[1-(l+(\alpha b))^3 D_0/(\alpha b)^3]]^{1/m} \tag{13}$$

蠕变失效随时间变化的翼裂纹长度(即 $l(t)$)可以为由式(6)的数值积分进行计算。用演化解代替翼裂纹长度代入式(13),可以得出应变和时间之间的关系为

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0[-\ln[1-(l(t)+(\alpha b))^3 D_0/(\alpha b)^3]]^{1/m} \tag{14}$$

式(14)可以反映某一岩石试样,相同的破坏值微观尺度和宏观尺度之间的关系。

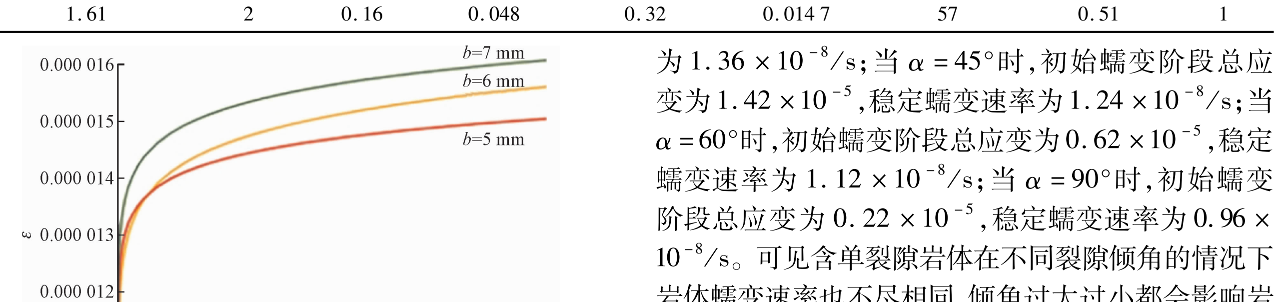
$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{3\varepsilon_0 D_0[\dot{l}(t)(l(t)+(\alpha b))^2]}{m[1-(l(t)+(\alpha b))^3 D_0]}\cdot\left[-\ln\left[1-\frac{(l(t)+(\alpha b))^3 D_0}{(\alpha b)^3}\right]\right]^{\frac{1-m}{m}} \tag{15}$$

对式(14)进行时间的求导可得式(15),得到岩石试样蠕变速率与变量之间的关系。

为了反映微观裂纹尺寸与宏观应变的关系,基于滑动翼裂纹模型,假设在给定的临界微裂纹长度下会发生宏观破坏,采用 maple 软件可得出式(14)中不同裂隙倾角和不同裂隙长度情况下的岩体应变随时间的关系,但基于滑动翼裂纹模型研究假设的局限性,maple 软件只能表达出岩体蠕变的初始蠕变阶段和稳定蠕变阶段,如图 2 ~ 3 所示,给定参数如表 1,参数均取自于中国锦屏大理石的实验结果。

表 1　参数取值

Tab. 1　Parameter values



K_{IC}/(MPa · $m^{1/2}$)	l_0/mm	v/(m · s^{-1})	D_0	β	ε_0	n	μ	m
1.61	2	0.16	0.048	0.32	0.014 7	57	0.51	1

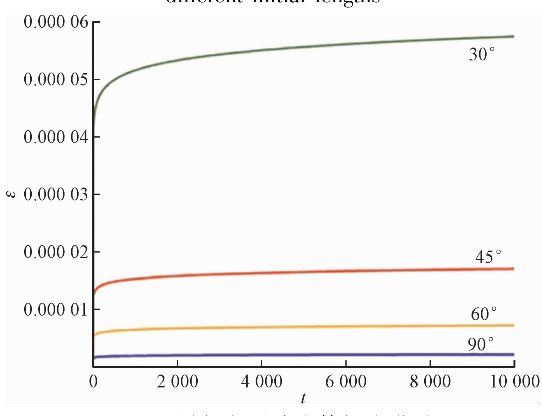


图 2　不同初始长度裂隙岩体蠕变曲线图

Fig. 2　Creep curves of fractured rock mass with different initial lengths

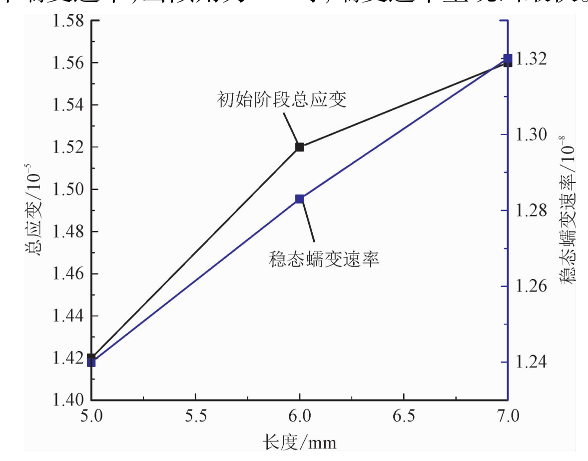


图 4　不同长度裂隙岩体初始阶段总应变与稳态蠕变速率

Fig. 4　Total strain and steady-state creeprate in initial stage of fractured rock mass with different lengths

图 3 不同角度裂隙岩体蠕变曲线图

Fig. 3　Creep curves of fractured rock mass at different angles

图 2 和图 4 可以得到,当 $b = 5$ mm 时,岩体的初始蠕变阶段总应变为 1.42×10^{-5},稳定阶段蠕变速率为 1.24×10^{-8}/s;当 $b = 6$ mm 时,初始蠕变阶段总应变为 1.52×10^{-5},稳态蠕变速率为 1.283×10^{-8}/s;当 $b = 7$ mm 时,初始蠕变阶段总应变为 1.56×10^{-5},稳定蠕变速率为 1.32×10^{-8}/s。由此可见,含不同初始长度裂隙岩体蠕变曲线趋势大致相同,岩体的蠕变速度随着裂隙的长度变化而发生相应变化,裂隙长度越长,蠕变速率越快。

由图 3 和图 5 可知,当 $\alpha = 30°$时,蠕变初始蠕变阶段总应变为 5.46×10^{-5},稳定蠕变阶段蠕变速率为 1.36×10^{-8}/s;当 $\alpha = 45°$时,初始蠕变阶段总应变为 1.42×10^{-5},稳定蠕变速率为 1.24×10^{-8}/s;当 $\alpha = 60°$时,初始蠕变阶段总应变为 0.62×10^{-5},稳定蠕变速率为 1.12×10^{-8}/s;当 $\alpha = 90°$时,初始蠕变阶段总应变为 0.22×10^{-5},稳定蠕变速率为 0.96×10^{-8}/s。可见含单裂隙岩体在不同裂隙倾角的情况下岩体蠕变速率也不尽相同,倾角过大过小都会影响岩体蠕变速率,当倾角为 30°时,蠕变速率呈现出最快。

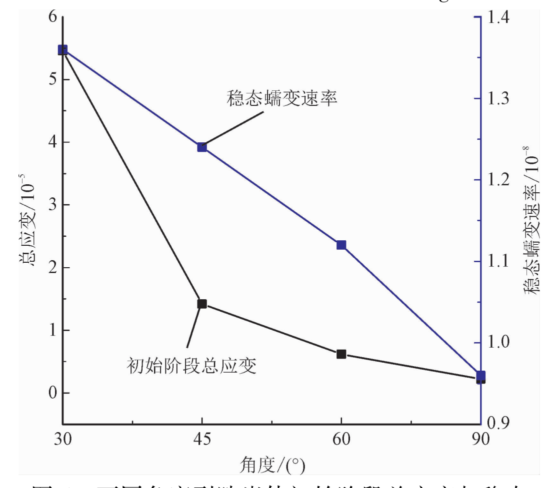


图 5　不同角度裂隙岩体初始阶段总应变与稳态

Fig. 5　Total strain and steady state in initial stage of fractured rock mass with different angles

2 蠕变破裂裂纹扩展演化数值模拟

2.1 连续-非连续变形计算基本原理

连续-非连续变形计算是基于连续介质力学的离散元方法，该方法将有限元与离散元进行耦合，在块体内部进行有限元计算，在块体边界进行离散元计算，不仅可以模拟材料在连续状态下及非连续状态下的变形、运动特性，更可以实现材料由连续体到非连续体的渐进破坏过程。

连续-非连续模型包括由微元素组成的弹性耦合表征元素。由于其组成微单元的断裂条件不同，每个表征单元具有不同的弹性模量(图 6)。对于给定的表征元素，弹性模量分布是根据其内部的断裂程度分布计算得出的，反映了岩石的微观非均质性。表征元素之间的连接(弹性或断裂)模拟了微观裂缝的萌生、扩展和连接，因此代表了在渐进式岩石蠕变和破裂过程中宏观裂缝的演变。

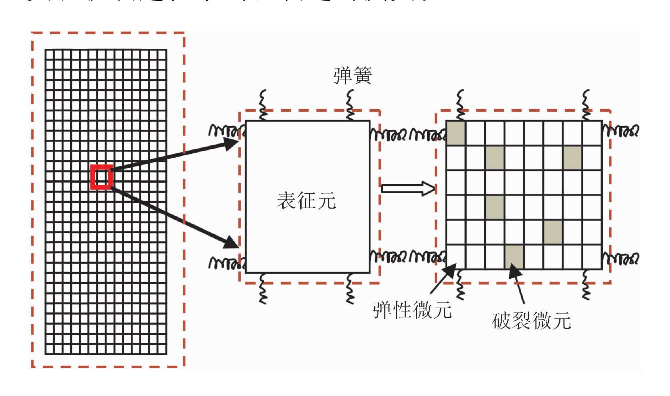


图 6 连续-非连续计算原理

Fig. 6 Multiscale rock model and its relations

2.2 计算模型及方案

根据理论分析可以看出，在不同的裂隙长度、裂隙倾角下，岩体蠕变变形特性不同。为更好的研究岩体蠕变过程中裂纹扩展演化规律，采用连续-非连续软件 GDEM 对含单裂隙岩石在恒定载荷作用下的裂纹扩展过程进行数值模拟，分析在不同的裂隙长度、裂隙倾角下岩体的蠕变曲线以及裂纹扩展演化规律。计算模型如图 7 所示，α 为裂隙与水平方向的倾角，b 为裂隙的半长度。模型尺寸为 50 mm × 100 mm，选取不同裂隙角度和长度进行计算，计算方案如表 2。

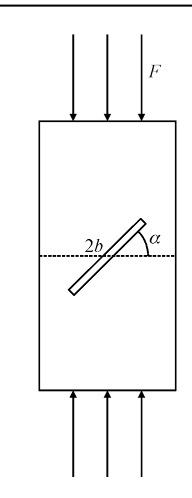


图 7 数值计算模型

Fig. 7 Simplified model diagram of test piece

表 2 计算方案

Tab. 2 Calculation scheme

	裂隙角度/(°)	裂隙长度/mm
方案一	0	10
	15	10
	30	10
	45	10
	60	10
	90	10
方案二	45	10
	45	12
	45	14

连续-非连续变形破裂过程中，连续变形和单元内采用 Mohr-Coulomb 模型，参数设置如表 3。

表 3 单元内计算力学参数

Tab. 3 Calculated mechanical parameters of rock mass

材料密度/(kg·m^{-3})	抗拉强度/MPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/MPa	粘聚力/MPa	剪胀角/(°)	泊松比
2 500	3	40.0	1×10^4	10	10.0	0.25

对于连续-非连续模型块体离散元，单元和单元之间采用可变形表征元接触弹簧的虚接触面，弹簧连接的本构模型为脆断模型(brittleMC)，材料参数如表 4 所示。

表 4 岩体接触面力学参数

Tab. 4 Mechanical parameters of rock mass contact surface

法向刚度/(Pa · m)	切向刚度/(Pa · m)	内聚力/MPa	抗拉强度/MPa	摩擦角/(°)
5×10^{13}	5×10^{13}	10	0.4	30.0

2.3　岩石蠕变破裂裂纹扩展演化过程

建立单裂隙岩体简化模型，裂隙长度为 10 mm，倾角为 30°，采用连续-非连续计算软件 GDEM 建立模型并进行网格划分，网格单元为三节点的三角形单元，模型底部固定，根据实验经验对顶部施加恒定应力 4 MPa，数值模拟时间步长为 $\mathrm{d}t = 1$ s。为了获得岩石恒定压力下的蠕变曲线，在模型上边缘中点设置位移监测点，根据监测点数据绘制蠕变曲线。蠕变曲线图如图 8 所示，不同蠕变阶段裂纹扩展演化过程如图 9 所示。

从图 8 和图 9 可以看出，含单裂隙岩体在恒定载荷作用下，细观裂纹萌生、扩展，宏观表现为蠕变变形。岩石蠕变共分为 3 个阶段，减速蠕变阶段，岩石发生弹性变形，随着时间的增加，裂纹在初始裂隙两端产生；等速蠕变阶段，裂纹进一步扩展、延伸，宏观变形增大；加速蠕变阶段，裂纹贯通，形成宏观断裂面，此时岩石仍然具有一定的承载能力，此后宏观变形加速，蠕变速率逐渐增大。

从图 9 裂纹扩展过程可以看出，在 0 步到 1 200 步过程中岩体处于弹性阶段，无次生裂隙产生；1 200步初始翼裂纹 a 在预制裂隙的下端产生，并垂直于预制裂隙；在 1 250 步翼裂纹 b 在预制裂隙上端产生；至 2 900 步时裂纹 a 持续扩展为裂纹 d、e；当到 5 550 步裂隙下端产生次生裂纹 c；在 6 400 步裂纹持续扩展产生新的裂纹 g、f；当扩展到 10 000 步时，预制裂纹上端开始产生次生裂纹，并在 40 000 步与裂纹 h 相联通形成新的裂纹 j，在 60 000 步时，最终裂纹贯通，岩石试件发生明显的宏观破坏带，翼裂纹的扩展方向与恒定载荷方向一致。

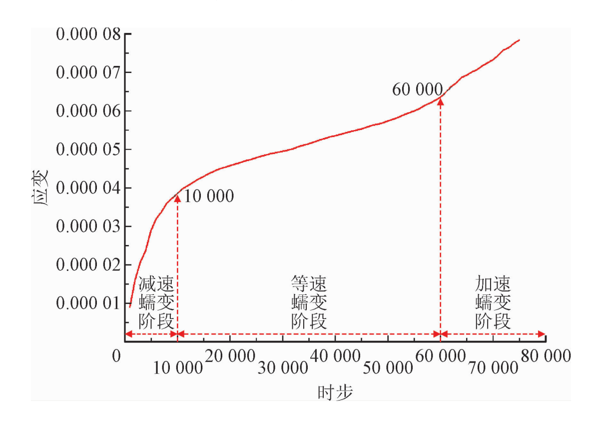


图 8　含单裂隙岩体蠕变变形曲线

Fig. 8　Creep curve of rock mass with single fracture

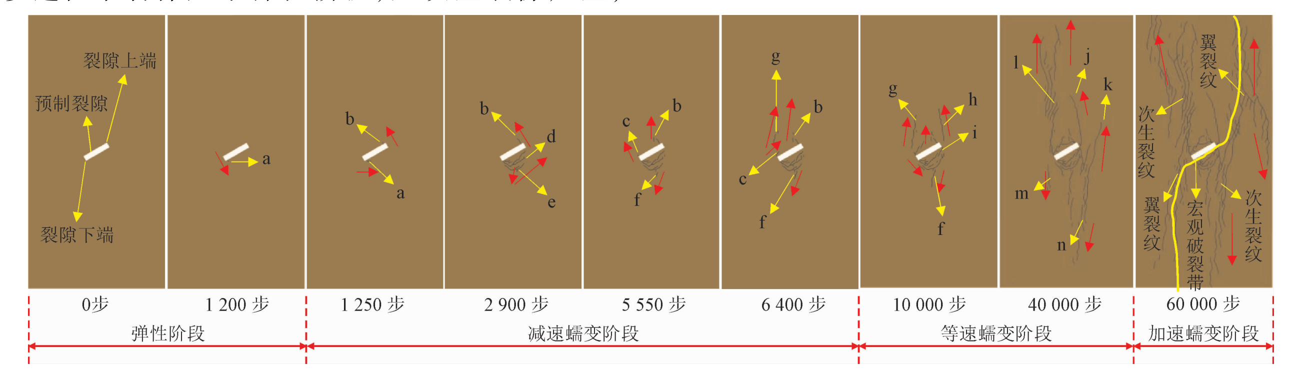


图 9　含单裂隙岩体蠕变破裂裂纹扩展过程

Fig. 9　Creep rupture crack propagation process of rock mass with single fissure

2.3.1　*裂隙角度对岩石蠕变破裂的影响*

选取含单一裂隙长度为 10 mm，宽度为 2 mm 的岩体模型，测试了不同裂隙角度（0°、15°、30°、45°、60°和 90°）下的单轴压缩蠕变实验数值模拟结果，可以得到在相同材料参数及加载应力情况下，裂隙角度变化时不同岩体蠕变破裂及等效位移云图，如图 10 所示。

从图 10 可以看出，在恒定载荷下，蠕变等效位移和发生蠕变断裂时的宏观行为对于不同的断裂角度情况有显著差异。当 $\alpha = 0°$ 时，主要变形方式为拉剪，产生垂直翼形裂纹，倾斜的次生裂纹不断扩大延伸，但结构相对稳定，破裂程度较小。当 $\alpha = 15°$ 时，裂隙尖端出现翼裂纹和次生裂纹，岩体发生剪切破坏，破裂程度较 $\alpha = 0°$ 增强。在 $\alpha = 30°$ 的情况下，裂纹尖端同时产生翼形裂纹和共面、倾斜的二次裂纹。裂缝不断发展，经过一定程度的膨胀后，通过“预制”断裂发生 X 型共轭剪切破坏。对于 $\alpha = 45°$，裂缝从主裂缝的尖端开始，翼裂缝继续扩大，直到发生穿透破裂，但在该角度，预制裂缝周围的破裂效果比 $\alpha = 30°$ 时略弱。在 $\alpha = 60°$ 的情况下，裂纹扩展效应似乎减弱，沿主断口上端纵向渗透。当 $\alpha = 90°$ 时，裂隙岩体形成相对稳定的结构，在荷载作用下，最大主应力方向平行于裂隙纵向，裂纹扩展不明显。

图 10 不同裂隙角度岩体及等效位移云图

Fig. 10 Rock masses with different fracture angles and equivalent displacement cloud diagrams

从图 11 和图 12 可以看出，在 1 200 步之前，断裂岩体的特征是所有断裂角度的瞬时弹性变形。从 1 200 步到 20 000 步，裂纹萌生发生在不同的方向，但每个断裂角的蠕变曲线相似，为减速蠕变阶段。从 20 000 步开始，变形进入等速蠕变阶段。从图 12 可以看出，此时不同断裂角度的蠕变速率明显不同。对于 $\alpha=0°$，蠕变速率为 6.05×10^{-9}/s；对于 $\alpha=15°$，蠕变速率为 8.36×10^{-9}/s；对于 $\alpha=30°$，蠕变速率为 1.06×10^{-8}/s；对于 $\alpha=45°$，蠕变速率为 7.03×10^{-9}/s；对于 $\alpha=60°$，蠕变速率为 6.00×10^{-9}/s；对于 $\alpha=90°$，蠕变速率为 4.87×10^{-9}/s。大约 50 000 步后，$\alpha=30°$ 的情况开始出现加速蠕变，进入第三阶段（加速蠕变）。当加载达到约 60 000 步时，$\alpha=45°$，60°断裂的情况也开始进入加速蠕变阶段。总体而言，岩体蠕变速率随初始断裂角的增大先增大后减小。断裂倾角为 30°时蠕变率最高，在这种情况下，岩体结构容易破裂。同时与图 3 对比分析可得到理论部分与数值模拟中相同部分裂隙角度的改变，对含裂隙岩体的蠕变破裂曲线影响规律相同。

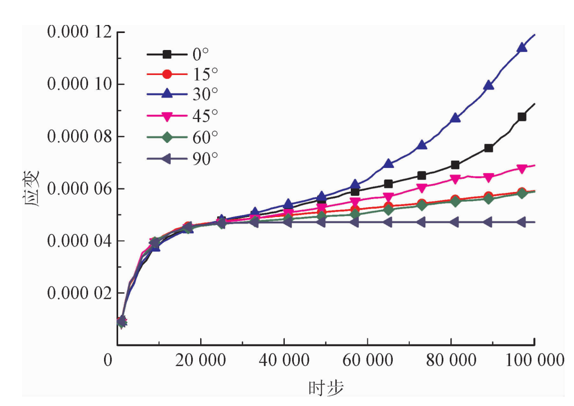


图 11 不同角度裂隙岩体宏观蠕变曲线图

Fig. 11 Macroscopic creep curves of fractured rocks

at different angles

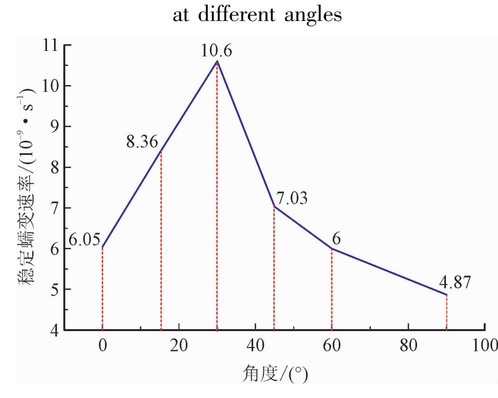


图 12　不同角度裂隙岩体稳定蠕变速率

Fig. 12　Stable creep rate of fractured rock masses at different angles

2.3.2　数值模拟与实验对比验证

连续-非连续软件 GDEM 用于模拟在恒定载荷下具有单个预先存在的裂隙的岩石中的裂纹扩展。在材料参数和加载应力相同的情况下,可以获得岩体模型和单轴压缩数值实验。不同的初始破裂角度导致不同的岩体破裂模式,这些可以与蒋明镜等[27]的实验室结果进行比较,如图 13 所示。

室内实验和 GDEM 数值模拟均表明,对于不同的初始破裂角度 α(其中 α 表示裂纹与水平面的夹角)存在以下现象。

当 $\alpha=0°$时,翼裂纹沿预制裂纹尖端沿轴向载荷方向扩展,随着时间的推移会出现较小的次生裂纹。

当 $\alpha=30°$时,裂纹萌生并沿预制裂纹扩展,最终渗透形成拉伸断裂。右翼裂纹的下端向右延伸,形成贯穿的二次裂纹。

当 $\alpha=45°$时,主裂缝右翼裂纹扩展并穿透。预制裂缝的右下端与次生裂缝形成闭合三角形面。

当 $\alpha=60°$时,剪切裂缝在预制倾斜裂缝的右端萌生,并沿加载方向扩展直至穿透。

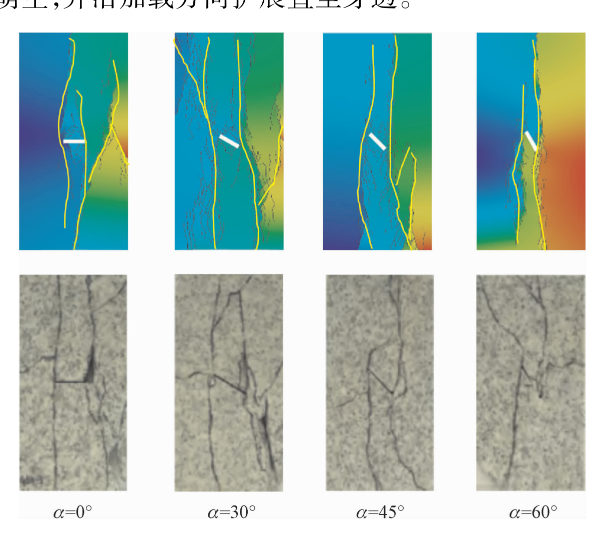


图 13　GDEM 模拟与室内试验试样破坏形态对比图

Fig. 13　Comparison of failure morphology of GDEM simulation and laboratory test specimens

从这个比较中可以清楚地看出,裂纹扩展模式的 GDEM 模拟与试验示例非常相似,其优点是可以更容易地在数值上跟踪破裂起始、扩展和发展方向。基于此,连续-非连续变形软件 GDEM 可以有效地模拟岩石裂缝扩展的演化过程。

2.3.3　裂隙长度对岩石蠕变破裂的影响

对具有 2 mm 宽度的单个 45°裂隙的岩体模型进行了数值模拟,用于单轴压缩蠕变实验,其中测试了不同裂隙长度(10、12、14 mm)的恒定材料参数和加载应力。不同长度的单个裂纹的蠕变破裂及等效位移云图如图 14 所示,不同长度的单个裂纹的蠕变变化曲线如图 15 所示。

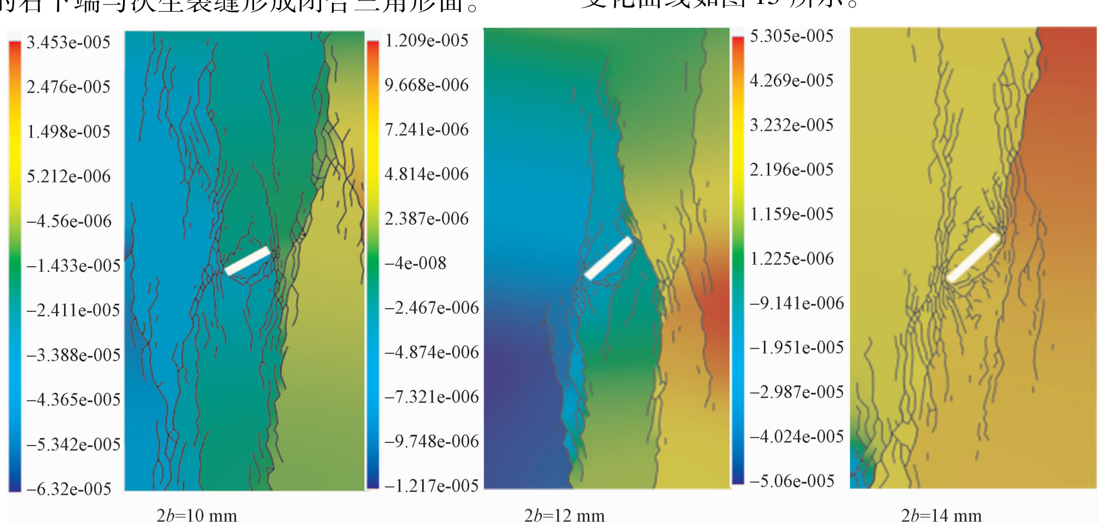


图 14　不同裂隙长度岩体及等效位移云图

Fig. 14　Rock masses with different fracture lengths and equivalent displacement cloud diagrams

图 14 表明,随着裂隙长度的增加,岩体空隙体积增大,结构不均匀性增加,裂纹扩展和破裂变得更加严重。蠕变速率与裂隙长度呈正相关。

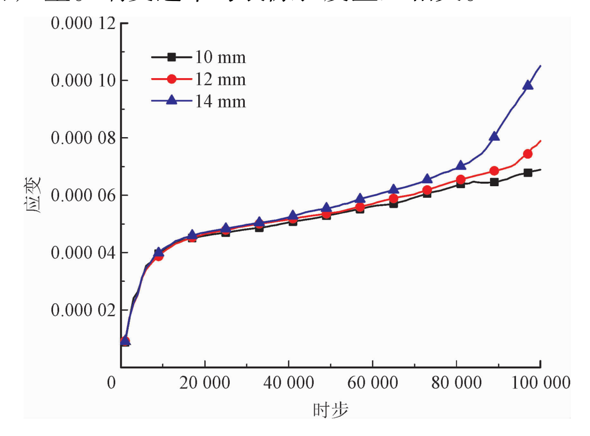


图 15　不同长度单裂隙蠕变变化曲线图

Fig. 15　Creep curve of a single crack with different lengths

由图 15 可知,在蠕变开始时,不同裂隙长度的蠕变速率是相似的。当变形进入等速阶段时,蠕变速率受裂纹长度的影响更为明显:裂纹越长,蠕变速率越高,进入加速蠕变阶段越早。蠕变速率和破裂程度都随着裂纹长度的增加而增加。通过与图 2 不同初始长度裂隙岩体蠕变曲线图对比,可得到在理论计算和数值模拟中,裂隙长度的改变,对含裂隙岩体的蠕变破裂曲线影响规律相同。

2.4　不同变量对蠕变破裂裂纹扩展影响机理

对于含单裂隙岩体蠕变破裂裂纹的扩展在裂隙两个端点处萌生并进一步扩展,在宏观表现为蠕变变形。裂纹的扩展演化与裂隙的角度和长度密切相关。通过以上含单一裂隙岩体在不同变量情况下的数值模拟分析,可以得出对于裂隙角度($\alpha=30°$)、长度($2b=14$ mm)对岩石蠕变破裂的影响最具明显。现选定含倾角为 45°,长度为 10 mm 的单一裂隙岩体为标准岩体,另取两组含单一裂隙岩体,只对其做单一变量处理,其裂隙尺寸分别为:A 组,裂隙倾角为 30°,长度为 10 mm;B 组,裂隙倾角为 45°,长度为 14 mm。现将其与标准岩体进行数值模拟对比,结果如图 16 所示。

通过图 16 中各个变量参数之间的蠕变曲线对比发现,各个参数对减速蠕变阶段影响不大,当步入等速蠕变阶段,对于角度变化时,蠕变速率为1.06×10^{-8}/s,对于长度变化时,蠕变速率为 8.24×10^{-9}/s,角度的变化对等速蠕变阶段速率的影响大于长度对其的影响,当进入加速蠕变阶段之后,可以发现长度对蠕变速率的影响会大于角度的影响,但长度变化的应变值较角度变化时略小。长度变化的影响在于改变了岩体空隙体积,随着裂缝长度的增加,岩体空隙体积增大,结构不均匀性增加,裂缝扩展和破裂变得更加严重;而对于裂隙角度改变时,不仅对岩体空隙体积有影响,还会对岩体整体结构形成影响,岩体随角度的改变,岩体结构会产生随角度而改变的较大剪切力,从而对岩体破裂产生较大影响,因此裂隙角度的改变对含裂隙岩体的蠕变影响要更大。

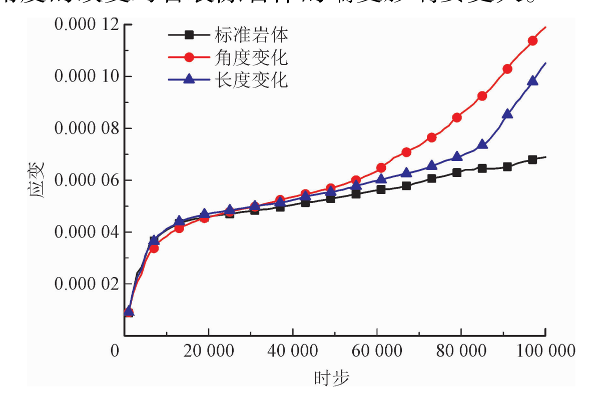


图 16　不同影响参数蠕变曲线对比图

Fig. 16　Comparison of creep curves of different influencing parameters

3　结　论

本研究推导了含单裂隙岩石宏观应变与微裂纹长度、角度之间的关系式,采用连续-非连续软件 GDEM 对含裂隙岩体蠕变破裂宏细观演化规律进行了模拟,对比研究了不同裂隙长度、裂隙角度下,含单裂隙岩体蠕变破裂演化规律,得出以下结论。

1)给出了恒定载荷下含单裂隙岩石宏观应变和应变率与微裂纹长度、角度之间关系式,绘制相应变化曲线并进行分析得出,含裂隙岩体蠕变变形随裂隙长度的增大而增大,随裂隙角度的增大出现先增大再减小的趋势,其中倾角为 30°时影响最大。

2)采用连续-非连续软件 GDEM 对含裂隙岩体蠕变破裂宏细观演化规律进行了模拟,由数值计算可以得出,岩石蠕变速率以及破裂程度随着裂隙长度的增加而增加,岩体破裂速度随着裂隙倾角的变大出现先增大后减小的情况,当裂隙倾角为 30°时尤为突出,可见当裂隙倾角为 30°时岩体结构容易发生破裂。

3)结合理论分析和数值模拟结果,分析单裂隙岩体蠕变裂纹扩展演化规律。裂隙角度和长度对减

速蠕变阶段影响较小,但角度改变对等速蠕变阶段速率的影响大于长度变化对其的影响,当进入加速蠕变阶段之后,可以发现长度对蠕变速率的影响会大于角度的影响,但是长度变化的应变值小于角度变化的应变值,可见相对与裂隙长度变量来说,裂隙角度变量对含裂隙岩体的蠕变影响更大。

4)含裂隙岩体蠕变破裂裂纹扩展演化规律的研究可为实际岩体工程中含裂隙类岩体蠕变破裂规律研究及蠕变治理提供理论参考。

参考文献:

[1] 杨圣奇,刘相如,李玉寿. 单轴压缩下含孔洞裂隙砂岩力学特性试验分析[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(增刊2):3539-3546.
YANG Shengqi,LIU Xiangru,LI Yushou. Experimental analysis of mechanical behavior of sandstone containing hole and fissure under uniaxial compression[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2012,31(S2):3539-3546(in Chinese).

[2] YANG S Q,JING H W,XU T. Mechanical behavior and failure analysis of brittle sandstone specimens containing combined flaws under uniaxial compression[J]. Journal of Central South University,2014,21(5):2059-2073.

[3] LI Y P,CHEN L Z,WANG Y H. Experimental research on pre-cracked marble under compression[J]. International journal of solids and structures,2005,42(9/10):2505-2516.

[4] NOLEN-HOEKSEMA R C,GORDON R B. Optical detection of crack patterns in the opening-mode fracture of marble[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts,1987,24(2):135-144.

[5] 贾东伟,张家瑶,赵飞,等. 单轴压缩下三裂隙黄砂岩力学特性及裂纹扩展试验研究[J]. 河北建筑工程学院学报,2019,37(4):56-61.
JIA Dongwei,ZHANG Jiayao,ZHAO Fei,et al. Experimental study on mechanical properties and crack propagation of three-fissure yellow sandstone under uniaxial compression[J]. Journal of Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering,2019,37(4):56-61(in Chinese).

[6] 蒲成志,曹平,赵延林,等. 单轴压缩下多裂隙类岩石材料强度试验与数值分析[J]. 岩土力学,2010,31(11):3661-3666.
PU Chengzhi,CAO Ping,ZHAO Yanlin,et al. Numerical analysis and strength experiment of rock-like materials with multi-fissures under uniaxial compression[J]. Rock and soil mechanics,2010,31(11):3661-3666(in Chinese).

[7] 陈新,李东威,王莉贤,等. 单轴压缩下节理间距和倾角对岩体模拟试件强度和变形的影响研究[J]. 岩土工程学报,2014,36(12):2236-2245.
CHEN Xin,LI Dongwei,WANG Lixian,et al. Experimental study on effect of spacing and inclination angle of joints on strength and deformation properties of rock masses under uniaxial compression[J]. Chinese journal of geotechnical engineering,2014,36(12):2236-2245(in Chinese).

[8] 郑文翔,赵延林,王敏. 单轴压缩条件下预制裂隙类岩石材料实验研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),2013,28(4):1-6.
ZHENG Wenxiang,ZHAO Yanlin,WANG Min. Experimental study on rock like material with crack under uniaxial compression[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology(natural science edition),2013,28(4):1-6(in Chinese).

[9] 蒲成志,曹平,衣永亮. 单轴压缩下预制 2 条贯通裂隙类岩材料断裂行为[J]. 中南大学学报(自然科学版),2012,43(7):2708-2716.
PU Chengzhi,CAO Ping,YI Yongliang. Fracture for rock-like materials with two transfixion fissures under uniaxial compression[J]. Journal of Central South University(science and technology),2012,43(7):2708-2716(in Chinese).

[10] 谢其泰,郭俊志,王建力,等. 单轴压缩下含倾斜单裂纹砂岩试件裂纹扩展量测研究[J]. 岩土力学,2011,32(10):2917-2921.
XIE Qitai,GUO Junzhi,WANG Jianli,et al. A study of crack propagation measurement on sandstone with a single inclined flaw under uniaxial compression[J]. Rock and soil mechanics,2011,32(10):2917-2921(in Chinese).

[11] 王辉,李勇,曹树刚,等. 含预制裂隙黑色页岩裂纹扩展过程及宏观破坏模式巴西劈裂试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(5):912-926.
WANG Hui,LI Yong,CAO Shugang,et al. Brazilian splitting test study on crack propagation process and macroscopic failure mode of pre-cracked black shale[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2020,39(5):912-926(in Chinese).

[12] 赵程,刘丰铭,田加深,等. 基于单轴压缩试验的岩石单裂纹扩展及损伤演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(增刊2):3626-3632.
ZHAO Cheng,LIU Fengming,TIAN Jiashen,et al. Study on single crack propagation and damage evolution mechanism of rock-like materials under uniaxial compression[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2016,35(S2):3626-3632(in Chinese).

[13] 李树刚,成小雨,刘超. 类岩石材料压缩破坏力学特性及裂纹演化特征[J]. 西安科技大学学报,2017,37(6):771-778.
LI Shugang,CHENG Xiaoyu,LIU Chao. Mechanics and crack evolution characteristics of rock-like material under compression failure[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology,2017,

37(6):771-778(in Chinese).

[14] 张仕林,杜贻腾,李廷春,等.单轴压缩荷载下红砂岩不同张开度三维通透裂隙扩展机理研究[J].西安科技大学学报,2016,36(4):548-553.
ZHANG Shilin,DU Yiteng,LI Tingchun,et al. Propagation mechanism of 3D through fracture with different width under uniaxial load[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology,2016,36(4):548-553(in Chinese).

[15] XU J,LI Z X. Damage evolution and crack propagation in rocks with dual elliptic flaws in compression[J]. Acta mechanica solida Sinica,2017,30(6):573-582.

[16] HUANG D,GU D M,YANG C,et al. Investigation on mechanical behaviors of sandstone with two preexisting flaws under triaxial compression[J]. Rock mechanics and rock engineering,2016,49(2):375-399.

[17] ASHBY M F,SAMMIS C G. The damage mechanics of brittle solids in compression[J]. Pure and applied geophysics,1990,133(3):489-521.

[18] ASHBY M F,HALLAM S D. The failure of brittle solids containing small cracks under compressive stress states[J]. Acta metallurgica,1986,34(3):497-510.

[19] BRANTUT N,BAUD P,HEAP M J,et al. Micromechanics of brittle creep in rocks[J]. Journal of geophysical research:Solid earth,2012,117(B8):B08412.

[20] LI X Z,QI C Z,SHAO Z S,et al. Static shear fracture influenced by historic stresses path and crack geometries in brittle solids[J]. Theoretical and applied fracture mechanics,2018,96:64-71.

[21] CHARLES R J. Static fatigue of glass. I[J]. Journal of applied physics,1958,29(11):1549-1553.

[22] ATKINSON B K. Subcritical crack growth in geological materials[J]. Journal of geophysical research:Solid earth,1984,89(B6):4077-4114.

[23] WEIBULL W. A statistical distribution function of wide applicability[J]. Journal of applied mechanics,1951,18(3):293-297.

[24] BRISTOW J R. Microcracks,and the static and dynamic elastic constants of annealed and heavily cold-worked metals[J]. British journal of applied physics,1960,11(2):81.

[25] WALSH J B. The effect of cracks on the compressibility of rock[J]. Journal of geophysical research,1965,70(2):381-389.

[26] WALSH J B. The effect of cracks in rocks on Poisson's ratio[J]. Journal of geophysical research,1965,70(20):5249-5257.

[27] 蒋明镜,张宁,申志福,等.含裂隙岩体单轴压缩裂纹扩展机制离散元分析[J].岩土力学,2015,36(11):3293-3300,3314.
JIANG Mingjing,ZHANG Ning,SHEN Zhifu,et al. DEM analyses of crack propagation in flawed rock mass under uniaxial compression[J]. Rock and soil mechanics,2015,36(11):3293-3300,3314(in Chinese).

(编辑　史淑英)